

引用格式:陈锦,谭凯,张卫国.基于地面三维激光扫描强度数据的潮滩表层含水量估算[J].地球信息科学学报,2020,22(2):290-297. [Chen J, Tan K, Zhang W G. Estimation of surface moisture of tidal flat based on intensity data of terrestrial laser scanner[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(2):290-297.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190213

基于地面三维激光扫描强度数据的潮滩表层含水量估算

陈锦,谭凯*,张卫国

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200241

Estimation of Surface Moisture of Tidal Flat based on Intensity Data of Terrestrial Laser Scanner

CHEN Jin, TAN Kai*, ZHANG Weiguo

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: Estimation of surface soil moisture and distributions play a key role in the ecological, environmental, and topographical investigations for intertidal mudflats, which are characteristically wet and periodically submerged by sea water. Unfortunately, existing techniques of large-scale surface moisture monitoring have measurement limitations, and the efficiency and accuracy of traditional methods are difficult to be ensured simultaneously. Thanks to the advantages of high precision, high resolution, and strong flexibility, Terrestrial Laser Scanners (TLSs) have been widely used to study the geomorphological features of intertidal mudflats. However, merely geometrical information is not enough to derive the physical characteristics of a mudflat, it is also necessary to mine intensity data of points cloud. Aside from the 3D points cloud, TLS can record the intensity value of each point, which contains spectral characteristics of the scanned target and is of vital importance to the improvement of TLS data classification and feature extraction. Most TLSs emit near-infrared lasers that can be strongly absorbed by water. Thus, the intensity values of areas with high water moisture are theoretically smaller than those of the regions with low moisture. In this study, the intensity data of TLSs were corrected for the incidence angle and distance effects, and the corrected intensity data were utilized to quantitatively estimate the surface soil moisture of intertidal mudflats. The Riegl VZ- 4000 long-distance terrestrial laser scanner with a near-infrared wavelength of 1550 nm was used to establish the indoor moisture model and to conduct a case study of a tidal flat in the Chongming Island, Shanghai, China. Additionally, 26 sediment samples were also collected by the traditional way of gravimetric measurements to get moisture. Results show that there was a power function relationship between the corrected intensity data and surface moisture, with the correction coefficient being 0.961 and the estimation accuracy reaching 91.94%. Our findings show that, compared with the traditional technique (i.e., gravimetric measurements), the corrected intensity data of long-

收稿日期:2019-05-07;修回日期:2019-09-16.

基金项目:上海市科委重点研究资助项目(18DZ1206400);国家重点研发计划项目(2017YFE0107400);中国博士后科学基金(2017M620141)。 [**Foundation items:** Shanghai Committee of Science and Technology, No.18DZ1206400; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFE0107400; China Postdoctoral Science Foundation, No.2017M620141.]

作者简介:陈锦(1995—),男,江苏扬州人,硕士生,研究方向为地面三维激光扫描技术在潮滩地区的应用。

E-mail: 2431016514@qq.com

*通讯作者:谭凯(1987—),男,湖北娄底人,博士后,研究方向为激光扫描技术点云强度研究。E-mail: mrtankai@qq.com

range TLSs are effective for quick, accurate, and detailed estimation of surface soil moisture over large areas.

Key words: intensity data; tidal flat; terrestrial laser scanner; surface moisture; intensity correction; Chongming Island, Shanghai

***Corresponding author:** TAN Kai, E-mail: mrtankai@qq.com

摘要:大面积潮滩表层含水量的测定是潮滩研究中的难题,传统的测量方法难以同时满足高效和精度的要求。地面三维激光扫描技术凭借其高精度、高分辨率以及主动性强等优点,已经高效运用在潮滩地形研究中。但是,对潮滩含水量进行有效分析,仅利用点云的空间几何信息是不够的,还需要对点云的强度数据进行挖掘。地面激光扫描仪提供了包含目标表面光谱反射特性的点云强度数据,利用强度数据可以有效地进行目标表面特性提取。本文提出了一种新的长距离地面激光扫描仪强度数据改正方法,对入射角和距离效应进行有效改正。利用 Riegl VZ-4000 长距离地面激光扫描仪建立室内含水量模型并对上海市崇明岛一处潮滩进行测试分析,同时收集 26 个潮滩沉积物样品并利用传统干湿称重法进行含水量验证计算。结果表明:相比于传统技术,利用改正后的激光强度值估算大面积潮滩沉积物表层含水量是一种精确和高效的方法。改正后的激光强度值与潮滩表层含水量存在幂函数关系,相关系数为 0.961,估算精度为 91.94%。

关键词:强度数据;潮滩;地面三维激光扫描;表层含水量;强度改正;上海崇明岛

1 引言

潮滩主要是指在河口潮间带由粘性颗粒泥沙所组成的滩地^[1-2],此区域生物种类丰富^[3],具有广阔的开发利用前景。由于经济发展、土地围垦、港口建设等原因^[4-5],潮滩区域的生态环境受到了很大的破坏,这进一步推动了对潮滩现状及开发利用潜力的分析研究。其中,潮滩沉积物表层含水量在潮滩观测研究中是一个至关重要的基础数据,对研究海岸带地区泥沙的搬运、潮流的涨落、动物的栖息迁徙等都有很大的作用^[6-10]。

近年来,对海岸表层沉积物含水量的测定研究取得很大进展,除了传统的烘干称重法,还包括 Delta-T Theta 探针法^[11]、遥感反演法^[12]、以及光学亮度分析法^[13]。但对于潮滩沉积物表层含水量的测定而言,由于沉积物含水量高,人难以行走,导致实际采样过程较为困难;同时在传统采样过程中很难有效控制采样的表层沉积物厚度、采样过程中水分的蒸发;此外,传统的烘干称重法和探针法只能得到某些稀疏离散点的水分,不能很好地反映整个区域水分的整体分布情况。遥感反演法和光学亮度法有测量范围广、非接触性的优点,但常规影像分辨率最高只能达到米级,缺少短周期精确监测沉积物表面特性变化的能力。此外,遥感反演法和光学亮度法还受到太阳光照、云层阴影、天气状况等的影响,使得其在潮滩含水量的测定方面受到很大程度的限制。

TLS 通过发射特定波长的激光(通常是近红外波段),不仅能获取目标的三维几何信息,还能通过光电接收系统记录目标对发射激光的“后向散射回

波强度”,也称为“激光强度”(Intensity)^[14-15]。激光强度数据表征目标对激光的反射光谱特性,是反映目标表面特性的重要物理量。利用激光强度数据可直接、精确、快速地对扫描目标表面的结构、材质、属性甚至运动特征等立体特征等信息进行提取和反演。由于水对近红外激光有很强的吸收作用,导致含水量高的区域的激光强度值小于含水量低的区域,因此,可以借助激光强度实现对潮滩含水量的定量测定。目前已有少数学者尝试利用 TLS 激光强度数据对目标表面含水量进行测定。Nield 等^[16-17]利用 TLS 激光强度信息对风成沉积环境下的砂质海滩进行沉积物表层含水量的测定与反演,发现二者具有很好的函数关系;Smit 等^[18]使用 TLS 激光强度信息对沙质海滩沉积物表层含水量进行了长时间尺度的监测,发现在环境变化较快的地方监测效果很好。但上述研究只将研究区域选在砂质海滩,其沉积物表层含水量范围在 0%~25%之间,对含水量更大的淤泥质潮滩并没有涉及。此外,这些方法使用的是未经改正的原始激光强度数据。但是,大量研究表明,TLS 原始激光强度数据受到目标反射率、大气衰减、扫描几何构造、仪器系统特性等因素的影响^[19-22],需要对原始强度数据进行改正,才能从中反演目标表面特性。

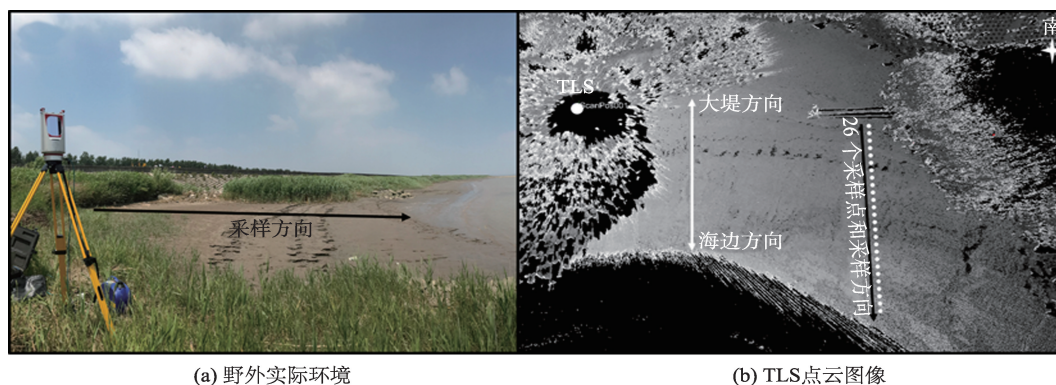
本文使用潮滩表层沉积物进行室内控制实验,获取了沉积物不同表层含水量下的激光强度值。对入射角和距离效应进行改正,得出改正后激光强度值与含水量之间的关系。利用这一关系,将潮滩 TLS 强度信息转化为含水量值,并与实际含水量采样结果进行比对。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本文选择上海市崇明岛靠近北支的某一淤泥质潮滩(121°21'51"E, 31°50'11"N)作为研究区域,如图1(a)。长江进入北支的径流和涨落潮流共同

控制着滩地的周期性变化,目前北支的流量仅占长江径流量的4%左右,潮流成为塑造该水道的主要动力^[23-25]。本文研究的潮滩是一个半开放式海岸,整个潮滩南北长约40 m,东西向约30 m。东西向被芦苇包围,南部为大堤,整个潮滩向北延伸。



(a) 野外实际环境

(b) TLS点云图像

图1 野外实际环境与TLS点云图像

Fig. 1 Geographical conditions and TLS points cloud of the field area

2.2 数据来源与处理

本文使用Riegl VZ-4000地面三维激光扫描仪进行试验数据采集。Riegl VZ-4000采用脉冲式测量方法进行测距:发射器向物体发射激光,激光在物体表面反射后再被仪器的接收器接收。激光传播速度为常数,通过测量激光从发射到返回接收器的时间计算仪器与目标之间的距离^[26](图2)。Riegl VZ-4000是奥地利Riegl公司新推出的VZ系列三维激光扫描仪,提供了优越的接近4000m的超长测距能力,可大大减少短中距TLS的标靶架设和数据配准。Riegl VZ系列扫描仪基于独一无二的数字化回波和在线波形分析功能,实现超长测距能力,其提供4种激光脉冲发射频率(PRR),分别为30、50、150、300 kHz,频率越高测量距离越短。激光波长为1550 nm,

激光发散度为0.14 mrad,扫描范围为水平0~360°,竖直60~120°,在500 m处的激光光斑为7 cm,测量精度为15 mm。Riegl VZ-4000的扫描数据由每个点的三维坐标 (x, y, z) 及强度值 I 组成。

本文室外数据获取时间为2018年6月8号,扫描过程中天气晴朗、无风且能见度高,实验设置为全景扫描,PRR设置为30 kHz,扫描范围设置为默认水平360°,竖直60°,水平角度分辨率设置为0.03°,垂直角度分辨率设置为0.02°。为了将TLS点云数据配准到大地坐标系下,本次实验采用反射片配准法。在扫描区域附件架设4个具有高反射强度的反射片。扫描仪配套软件RiSCAN PRO v1.8.1能对反射片进行自动识别,并精确计算各个反射片的中心位置。扫描工作完成后,采用GPS-RTK系统对反射片位置进行测量,获取其绝对坐标。然后利用坐标转换将点云数据转换到大地坐标系下。点云数据的预处理通过Riegl配套软件RiSCAN PRO v1.8.1进行。

为了求取含水量和改正后强度数据之间的关系,在扫描工作完成之后立刻进行了潮滩样品数据采集。用刮刀采集面积5 cm×5 cm、表面厚度约1 cm的沉积物样品,采样区域从距水面28 m处开始,到距离水面2 m处结束,间隔1 m直线采样,共26个表层沉积物样品,采样方向如图1(b)所示。每个采样点同时利用RTK进行坐标测量,便于查找每

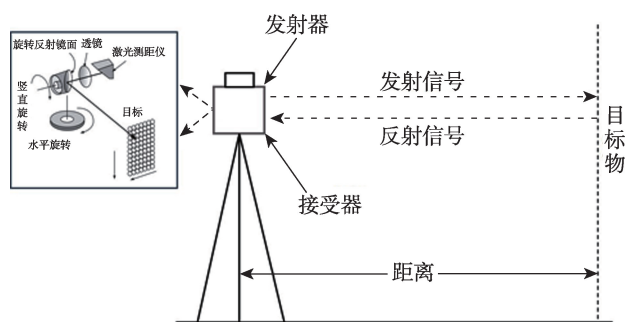


图2 地面三维激光扫描仪工作原理

Fig. 2 Schematic diagram of TLS

个采样点在点云坐标里的精确位置。野外现场测定含水量非常困难且不可靠,所以用塑料密封袋将表层沉积物样密封,带回实验室进行含水量的测量。在实验室中,将样品放在坩埚中,测量样品烘干前的湿重。样品的烘干需要在 105 °C 下烘干 24 h,得出样品烘干后的干重,最后得出含水量 $w\%=(\text{湿重}-\text{干重})/\text{湿重}$ ^[27]。

2.3 室内控制实验

为了得到潮滩沉积物不同表层含水量下的激光强度值,本文设计了室内控制实验。利用野外潮滩沉积物样品,将样品按 1 cm 高度均匀平铺在塑料托盘上。每隔 1 h 对其进行扫描实验,并同时记录沉积物与托盘的质量,直至总质量不再变化认为完全干燥,含水量为 0%。室内实验 PPR 设置为 300 kHz,水平角度分辨率设置为 0.03°,垂直角度分辨率设置为 0.02°。

由于室内外实验距离要求不同,所以选取的激光脉冲频率不同。由于激光脉冲频率越高,回波强度值越小^[28]。所以对于两次扫描任务,需要进行强度值的换算。本文利用 PPR 分别为 30、50、150、300 kHz 对 0%、18% 和 29% 含水量的沉积物进行扫描实验,得出脉冲发射频率与强度值之间的关系。

3 强度数据改正方法

对于 TLS 系统而言,激光强度受到仪器特性、大气传输特性、扫描几何构造、目标表面特性等多种因素的影响。但在同一次扫描任务中,大气衰减可以忽略,扫描仪器特性可看作稳定不变,激光强度数据主要受到目标反射率、入射角和距离 3 个因素的影响^[29]。此外,潮滩沉积物的表面特性主要受粒径组成和含水量的影响,对于沉积物表层含水量的测定而言,分析其粒径组成是至关重要的。

3.1 粒径组成对激光强度影响分析

本文使用库尔特激光粒度仪(Coulter LS13320)对 26 个样品进行粒度分析,粒度样品的前处理方法参照文献[30]。从图 3 可以看出,粒径集中在 20~60 μm 之间,说明粉砂是选取的潮滩沉积物最主要的组成部分。并且 26 个样品粒度频率曲线趋势一致,说明本文选取的野外潮滩地区沉积物组成差异不大,具有一致性,可以消除其对激光强度值的影响。因此可以说明本实验影响强度数据的主要因素是含水量,组成成分对强度的影响可以忽略不计。

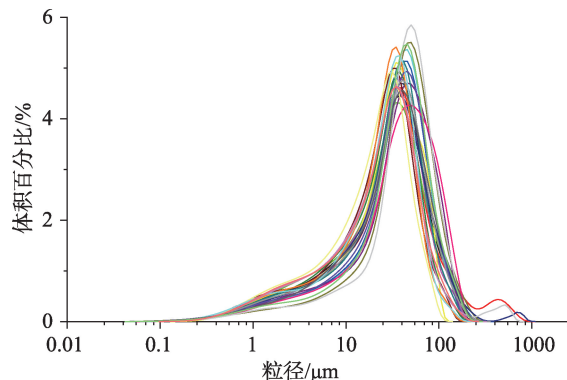


图3 潮滩表层沉积物粒度频率曲线

Fig. 3 Frequency distribution of grain size for surface sediments in the tidal flat

3.2 入射角和距离效应的改正

激光强度数据主要受到目标反射率、入射角和距离 3 个因素的影响,可以将强度值表达为:

$$I = f_1(\rho) \cdot f_2(\cos \theta) \cdot f_3(R) \quad (1)$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 分别为目标反射特性 ρ 、入射角余弦 $\cos \theta$ 以及距离 R 的函数。

为了从强度数据中提取目标反射率,需要对入射角和距离是 2 个因素进行改正。定义 I_s 为改正后的激光强度值,则:

$$I_s = f_1(\rho) \cdot f_2(\cos \theta_s) \cdot f_3(R_s) \quad (2)$$

式中: $\cos \theta_s$ 、 R_s 分别为设置的实验参考入射角和距离值。

根据文献^[22]的经验,可以用多项式对 $f_2(\cos \theta)$ 、 $f_3(R)$ 进行近似替代,如式(3)所示。

$$\begin{cases} f_2(\cos \theta) = \sum_{i=0}^{N_1} (\cos \theta)^i \alpha_i \\ f_3(R) = \sum_{i=0}^{N_2} (\beta_i R^i) \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)、(3)代入式(2),则可得到改正后的强度数值公式:

$$I_s = I \cdot \frac{\sum_{i=0}^{N_1} (\alpha_i \cos \theta_s^i) \cdot \sum_{i=0}^{N_2} (\beta_i R_s^i)}{\sum_{i=0}^{N_1} (\alpha_i \cos \theta^i) \cdot \sum_{i=0}^{N_2} (\beta_i R^i)} \quad (4)$$

式中: N_1 、 α_i 、 N_2 、 β_i 为多项式参数。

本文使用 A4 白纸作为目标反射面,在 7.5 m 固定距离下,逐渐旋转白纸从而改变入射角的大小(图 4)。在入射角为 0° 时,将 TLS 激光发射器对准图 3 中 2 cm × 2 cm 红色区域,并默认为此区域内激光垂直于纸面。实验从 0~80° 相隔 5° 进行扫描测量,并选取图中红色区域的点云强度数据,通过多站数据利用最

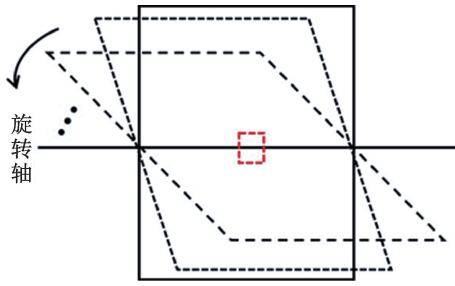


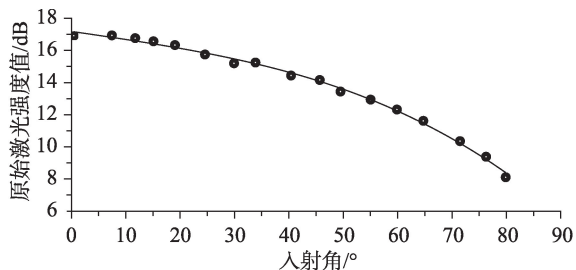
图4 入射角改正实验示意

Fig. 4 Schematic figure showing how the correction of incident angle experiment doing

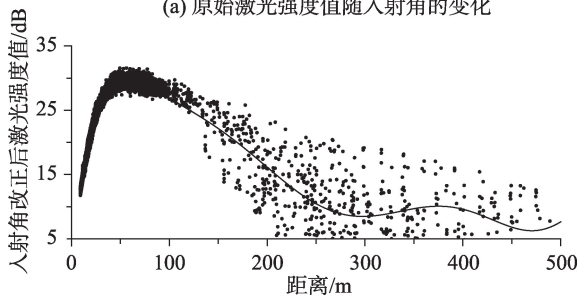
小二乘平差即可求得入射角函数的参数。

入射角实验结果如图5(a)所示,通过入射角改正实验可以发现,点云的原始激光强度值与入射角之间存在一定的函数关系,随着入射角的增大,原始激光强度值减小。通过比较拟合结果的决定系数,本文选取3阶多项式,通过最小二乘平差得到强度数据和入射角之间的函数关系,具体参数见表1。

本文选取了一段位于崇明岛西沙湿地附近约500 m的大堤作为测试目标,由于其距离长、目标表面特性均一而且形状规则利于选取点云,故是距离



(a) 原始激光强度值随入射角的变化



(b) 入射角改正后的激光强度值随距离的变化

图5 入射角和距离与激光强度值间的关系

Fig. 5 Relationship between incidence angle, distance effect and intensity

表1 入射角改正参数

Tab. 1 Parameters of the incident angle correction

阶数	3阶参数	2阶参数	1阶参数	常数	决定系数
3	-10^{-5}	9×10^{-5}	5.03×10^{-2}	17.184	0.9961

效应改正的理想目标。利用式(4)得到图5(b)入射角改正后强度值与距离之间的函数关系。由图5(b)可知,5~70 m间激光强度值随距离的增大而增大;70~250 m间随距离的增大而减小;250 m之后,由于噪点的增多和数据的离散不能进行很有效的定量研究,但仍具有减小的趋势。本次实验参考角度和参考距离分别取70°和70 m,入射角计算采用与邻近点云拟合最优平面的方法;距离计算则通过点云的坐标。通过比较拟合结果的决定系数,本文运用7阶多项式函数进行点云的拟合,具体参数见表2。

表2 距离改正参数

Tab. 2 Parameters of the distance correction

阶数	7阶参数	6阶参数	5阶参数	4阶参数
7	1.559	1.399	2.484×10^{-2}	2.053×10^{-4}
3阶参数	2阶参数	1阶参数	常数	决定系数
-9.269×10^{-7}	2.312×10^{-9}	-2.971×10^{-12}	1.529×10^{-15}	0.9814

3.3 激光脉冲发射频率换算

分别利用30、50、150、300 kHz频率对0%、18%和29%含水量的沉积物表面进行扫描实验,可以发现对于不同目标表面,脉冲发射频率与强度值之间都具有很好的线性关系(图6)。对于含水量为0%、18%和29%的沉积物表面,二者之间的线性关系斜率分别为: -0.0228 、 -0.0258 和 -0.0258 ,截距分别为:21.334、17.549和16.190。说明不同目标表面影响的是截距大小,并不影响两者之间的比值。所以不同频率所得到的强度值可以进行相互转换,改正后的强度值与发射频率也符合这一规律。

4 含水量计算结果及其精确度分析

4.1 室内沉积物表层含水量模型

含水量控制实验从最高含水量39.91%进行扫描,直到沉积物自然烘干到含水量为0%,共进行61次扫描实验。实验控制实验结果(图7)可以发现,改正后的强度值与含水量之间具有很好的函数关系。根据经验^[12],本文利用幂函数进行拟合,决定系数 R^2 为0.961,拟合公式为:

$$w = 3 \times 10^7 I_s^{-5.142} \quad (5)$$

式中: w 为含水量值; I_s 为改正后的激光强度值。

4.2 野外沉积物数据分析

在对26个野外表层沉积物样品进行含水量测定和点云数据处理后,由图8(a)可知从大堤到海

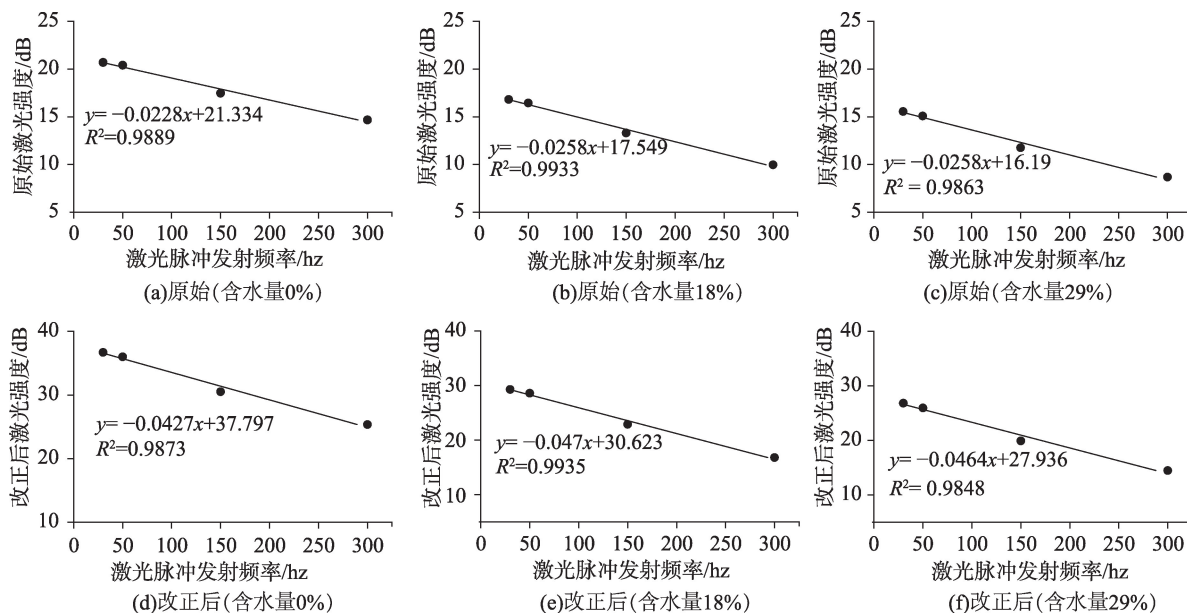


图6 激光脉冲发射频率与改正后的激光强度之间的关系

Fig. 6 Relationship between PRR and corrected intensity

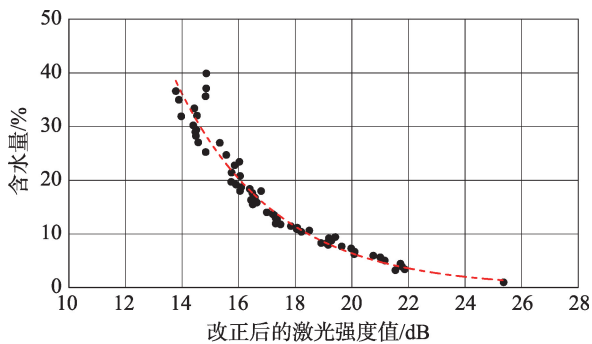


图7 激光脉冲发射频率与改正后的激光强度之间的关系

Fig. 7 Relationship between PRR and corrected intensity

岸线方向高程有明显的下降趋势,同时表层沉积物样品的含水量呈逐渐增大的趋势,且有明显波动。采集的26个表层沉积物平均含水量为35.04%,由图8(b)可知最低含水量位置处于距离海边最远的第一个采样点位置,值为27.01%;最大含水量位置处于靠近海岸线倒数第3个采样点位置,值为46.01%。同时改正后的激光强度值随距离的变化也很明显,由图8(c)可知由大堤向海面整体呈下降趋势,激光强度最大值出现在表层沉积物含水量最低的位置,最小值出现在表层沉积物含水量最高的位置。理论上,水对激光存在吸收,会引起激光强度值的减少,本次野外实验结果与理论相一致。

4.3 室内计算结果与野外数据对比

将室内实验数据与野外数据结合比较,可发现

野外数据与室内模型具有很好的一致性,野外数据沿着拟合曲线往上延伸,均匀分布在拟合曲线两侧,改正后的激光强度值与含水量有较好的拟合关系,如图9所示。

利用式(6)真实含水量和计算所得的含水量进行精度定量计算:

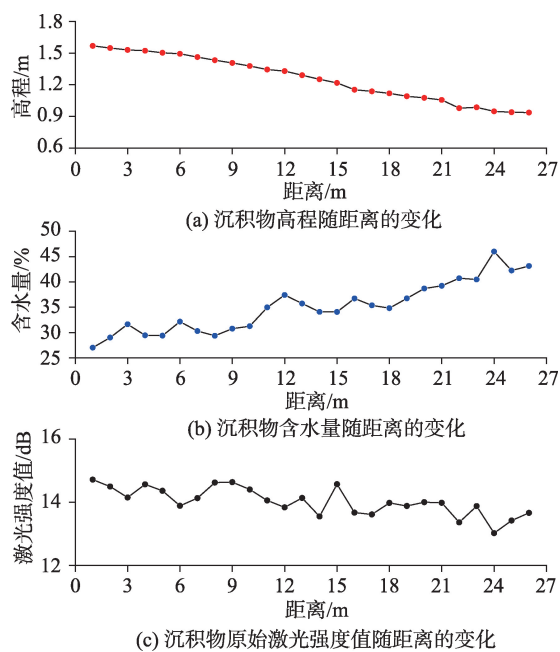


图8 沉积物高程、含水量和原始激光强度值随距离的变化
Fig. 8 Relationships of sediment elevation surface moisture, intensity and distance

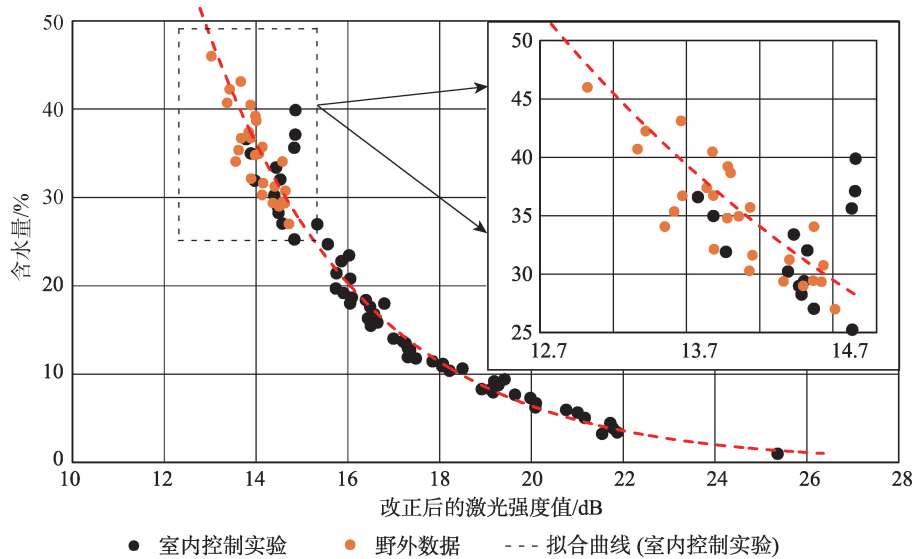


图9 室内与室外改正后的强度值和沉积物含水量数据比较

Fig. 9 Comparison between indoor and outdoor data of corrected intensity and sediment moisture

$$\delta = \left(1 - \frac{|W - w|}{W} \right) \times 100\% \quad (6)$$

图(9)中, δ 均值为91.94%。即对于26个野外数据,公式计算得到的含水量与真实含水量相比较,计算精度为91.94%。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文利用TLS技术对潮滩表层沉积物含水量的估算进行了初步探讨与分析。得出了以下结论:

(1)TLS系统激光强度值同时受到入射角和距离影响,需要进行改正才能用于含水量的估算。本实验采用室内和室外实验分别对Riegl VZ-4000型号地面三维激光扫描仪建立了激光强度值与入射角和距离之间的关系,消除了入射角和距离效应对激光强度值的影响。

(2)本实验所提出的含水量模型适用于含水量范围在0%~46%之间,以粉砂为主的潮滩沉积物,其改正后的强度数据可以精确地反演潮滩含水量。

5.2 讨论

本文利用Riegl VZ-4000地面三维激光扫描仪对潮滩表层沉积物进行含水量估算,研究区属于典型的淤泥质潮滩,沉积物类型以粉砂为主,可估算的沉积物含水量范围在0%~46%之间,估算精度达到91.94%。相比文献[17,31],本研究对沉积物含水量估算的精度更高,含水量测定范围也有显著的提

高。与利用遥感和影像进行沉积物含水量反演的研究^[13,32]相比,利用TLS对沉积物含水量估算的精度也相对较高,此外本研究还具有厘米级分辨率和短时间测量的优势。

后续研究应该考虑大气衰减和仪器特性对强度数据的影响,进一步提高强度数据改正以及含水量估算的精度;同时应该考虑不同沉积物粒度组成对激光强度的影响程度,完全消除粒度对激光强度的影响。

参考文献(References):

- [1] 时钟,陈吉余,虞志英.中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J].地球科学进展,1996,11(6):555-562. [Shi Z, Chen J Y, Yu Z Y. Sedimentation on the intertidal mudflat in china: an overview[J]. Advances in Earth Science, 1996,11(6): 555-562.]
- [2] Stark J, Van O, Meire P, et al. Observations of tidal and storm surge attenuation in a large tidal marsh[J]. Limnology and Oceanography, 2015,60(4):1371-1381.
- [3] Temmerman S, Meire P, Bouma TJ, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. Nature, 2013,504:79-83.
- [4] Teuchies J, Vandenbruwaene W, Carpentier R, et al. Estuaries as filters: The role of tidal marshes in trace metal removal[J]. PLOS One, 2013,8(8):e70381.
- [5] Robert C, Rudolf G, Pual S, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014,26:152-158.
- [6] 任美镔.中国淤泥质潮滩沉积研究的若干问题[J].热带海洋,1985(2):6-14. [Ren M E. A study on sedimentation of tidal mud flats of china[J]. Journal of Tropical Oceanogra-

- phy, 1985(2):6-14.]
- [7] Sarre R. Evaluation of aeolian sand transport equations using intertidal-zone measurements, Saunton Sands, England[J]. *Sedimentology*, 2006,37(2):385-392.
- [8] Wiggs G, Baird A. The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind[J]. *Geomorphology*, 2004(59):13-30.
- [9] Davidson A, Robin G, Kelvin M, et al. The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach[J]. *Geomorphology*, 2005(68):115-129.
- [10] Yang S L, Fan J Q, Shi B W, et al. Remote impacts of typhoons on the hydrodynamics, sediment transport and bed stability of an intertidal wetland in the Yangtze Delta [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,575:755-766.
- [11] Schmutz P, Namikas S, Steven L. Utility of the Delta-T theta probe for obtaining surface moisture measurements from beaches[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011,27(3): 478-484.
- [12] 韩飞.淤泥质海岸潮滩表层沉积特征遥感研究[D].南京: 南京师范大学,2015. [Han F. Remote sensing study on surface sedimentary characteristics of coastal tidal flat [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.]
- [13] Darke I, Ollerhead D. Measurement of beach surface moisture using surface brightness[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009(251):248-256.
- [14] Höfle B, Geist T, Rutzinger M, et al. Glacier surface segmentation using airborne laser scanning point cloud and intensity data[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007(3/W52):195-200.
- [15] Kashani A, Olsen M, Parrish C, et al. A review of LiDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration[J]. *Sensors*, 2015,15 (11):28099-28128.
- [16] Nield J, Wiggs G, Squirrell R. Aeolian sand strip mobility and protodune development on a drying beach: examining surface moisture and surface roughness patterns measured by terrestrial laser scanning[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011,4(36):513-522.
- [17] Nield J, King J, Jacobs B. Detecting surface moisture in aeolian environments using terrestrial laser scanning[J]. *Aeolian Research*, 2014(12):9-17.
- [18] Smit Y, Ruessink G, Brakenhoff L, et al. Measuring spatial and temporal variation in surface moisture on a coastal beach with a near-infrared terrestrial laser scanner[J]. *Aeolian Research*, 2018(31):19-27.
- [19] Soudarissanane S, Lindenbergh R, Menenti M, et al. Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011,66(4):389-399.
- [20] Lichti D D, Gordon S J, Tipdecho T. Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2005,131(4):135-142.
- [21] Lichti D D. Error modelling, calibration and analysis of an AM- CW terrestrial laser scanner system[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2007,61 (5):307-324.
- [22] 胡以华.激光成像目标侦察[M].北京:国防工业出版社, 2013. [Hu Y H. Laser Imaging Target Reconnaissance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.]
- [23] 杨欧,刘苍宇.长江口北支沉积物粒径趋势及泥沙来源研究[J].*水利学报*,2002(2):79-84. [Yang O, Liu C Z. Analysis on sediment transport patterns and sediment sources of north branch of Changjiang estuary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(2):79-84.]
- [24] 周开胜,孟翊,刘苍宇,等.长江口北支潮流沉积物磁性特征与沉积环境分析[J].*海洋通报*,2008(5):47-55. [Zhou K S, Meng Y, Liu C Z, et al. Magnetic properties and sedimentary environment of the Xinglong sand in the north branch, the Yangtze estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2008(5):47-55.]
- [25] 李一鸣.近三十年来长江口河槽沉积特征及其影响因素研究[D].上海:华东师范大学,2018. [Studies on sediment characteristics and the influencing factors in the Yangtze estuary riverbed during the recent 30 years[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.]
- [26] 谢卫明,何青,章可奇,等.三维激光扫描系统在潮滩地貌研究中的应用[J].*泥沙研究*,2015(1):1-6. [Xie W M, He Q, Zhang K Q, et al. Application of the terrestrial laser scanner to measuring geomorphology in tidal flats and salt marshes[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(1):1-6.]
- [27] Davidson R. Introduction to coastal processes and geomorphology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [28] Höfle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007,62(6): 415-433.
- [29] Tan K, Chen J, Qian W, et al. Intensity data correction for long-range terrestrial laser scanners: A case study of target differentiation in an intertidal zone[J]. *Remote Sensing*, 2019,11(3):331.
- [30] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,1999. [Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 1999.]
- [31] Smit Y, Ruessink G, Brakenhoff L B, et al. Measuring spatial and temporal variation in surface moisture on a coastal beach with a near-infrared terrestrial laser scanner[J]. *Aeolian Research*, 2017,31:19-27.
- [32] 张东,李欢,郑晓丹.潮滩表层沉积物含水量的高光谱预测模型与反演分析[J].*地球信息科学学报*,2013,15(4): 581-589. [Zhang D, Li H, Zheng X T. The moisture content prediction model of surface sediment in intertidal flat by hyperspectral remote sensing[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013,15(4):581-589.]